

04;15

Регистрация изображений лазерной плазмы в жестком рентгеновском излучении с помощью преломляющих линз с аксиальной симметрией

© Р.В. Гаранин¹, Н.В. Жидков¹, Г.А. Павлов², Н.А. Суслов¹,
В.В. Треушников³, В.М. Треушников³

¹ РФЯЦ Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

² Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Московская обл.

³ ООО „Репер-НН“, Нижний Новгород

E-mail: pavl4411@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2015 г.

Реализована экспериментальная схема для исследования сгустков лазерной плазмы в экстремальных условиях с использованием составной рентгеновской линзы. Зарегистрировано изображение сгустка лазерной плазмы в жестком рентгеновском излучении при облучении Си фольги интенсивным лазерным излучением.

Генерация лазерной плазмы ряда веществ при сверхвысоких давлениях, плотностях внутренней энергии и температурах была проведена в ударно-волновых экспериментах, при облучении различных мишеней интенсивными короткими лазерными импульсами или пучками тяжелых ионов [1–5]. Исследования такой плазмы актуальны для различных приложений. Они позволяют получить данные о теплофизических свойствах веществ в экстремальных состояниях, характере быстропротекающих процессов в таком веществе, условиях реализации лазерного термоядерного синтеза.

При обработке данных в ударно-волновых экспериментах обычно предполагалось, что энерговыход в образец вещества производился в течение наносекунд (в зависимости от источника), а образец в течение ~ 100 ns находился в экстремальном и квазиоднородном состоянии. Этот временной интервал достаточно велик для достижения теплового равновесия в среде, но и достаточно мал, чтобы пренебречь

энергетическими потерями. В то же время лазерная плазма характеризуется резкой неоднородностью и неравновесностью, связанными с гидродинамическими неустойчивостями, отрывом электронной и ионной температур и существенной концентрацией „горячих“ электронов. Следовательно, предположения о свойствах плазменного образования требуют экспериментального подтверждения. Применение оптических методов в видимом диапазоне для изучения „рельефа“ плазмы часто невозможно из-за мощного теплового излучения среды, которое необходимо экранировать. Поэтому в работе предлагается диагностика лазерной плазмы по ее излучению в жестком рентгеновском диапазоне с использованием рентгеновских полимерных преломляющих линз с аксиальной симметрией [6], объединенных в составную линзу с необходимыми характеристиками [7–9]. В описываемом эксперименте составная рентгеновская линза впервые применена для исследования в жестком рентгеновском излучении изображения лазерной плазмы, возникающей под действием мощного импульса лазерного излучения на медную фольгу.

Известно, что распространение рентгеновского излучения в веществе можно описать комплексным показателем преломления: $n = 1 - \delta + i\beta$, мнимая часть β зависит от коэффициента поглощения рентгеновского излучения в веществе, действительная часть $1 - \delta$ представляет собой показатель преломления рентгеновского излучения веществом [7]. Значения δ для рентгеновского излучения составляют малую величину $10^{-5} - 10^{-6}$, показатель преломления несколько меньше 1, поэтому фокусирующая рентгеновская линза с аксиальной симметрией представляет собой углубление в материале определенной формы [7]. Фокусное расстояние F_s одиночной преломляющей рентгеновской линзы определяется выражением $F_s = R/\delta$, где R — радиус кривизны в вершине углубления. Такие линзы характеризуются длинным фокусным расстоянием (до десятков метров) и требуют малых (десятки микрон) радиусов кривизны преломляющей поверхности в вершине линзы. На практике для получения более короткого фокусного расстояния обычно используются составные линзы, состоящие из N одинаковых линз. Фокусное расстояние такой линзы определяется соотношением $F_N = F_s/N$.

Использование преломляющих линз для фокусировки рентгеновского излучения быстро расширяется. Для изготовления линз применяются различные материалы и технологии [6–11]. В работах [6,8,9] была описана фокусирующая аксиальная 3D-линза с параболическим профилем

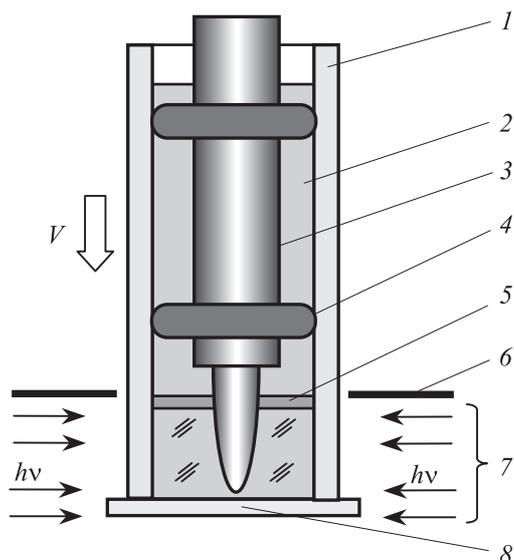


Рис. 1. Схема изготовления единичных рентгеновских линз [6]: 1 — стеклянный капилляр, 2 — ФПК, 3 — игла, 4 — эластичные кольца, 5 — тонкий полимеризуемый слой, 6 — защита между светлой и темной областями, 7 — внешнее излучение, инициирующее полимеризацию ФПК, сборка погружается в область отверждения со скоростью V , 8 — плоская пластина — дно сборки.

преломляющей поверхности, изготовленная из полимера с памятью формы. Следует отметить, что линзы с параболическим профилем обладают минимальными сферическими aberrациями. Пространственное разрешение таких линз близко к дифракционному пределу.

Для изготовления полимерных линз с аксиальной симметрией, используемых в эксперименте, применен одностадийный метод фронтальной фотополимеризации [12,13,6], который позволяет одновременно провести полимеризацию фотополимеризуемого компаунда (ФПК) и изготовить из него изделие заданной формы с высокой точностью. Сборка для изготовления линзы (рис. 1) [6] состоит из кварцевой трубки и латунного штампа („иглы“) в форме параболоида вращения с уравнением поверхности $z = 10r^2$. Радиус кривизны в вершине „иглы“ составляет $\sim 50 \mu\text{m}$. „Игла“ соосно вводится в кварцевую трубку, затем

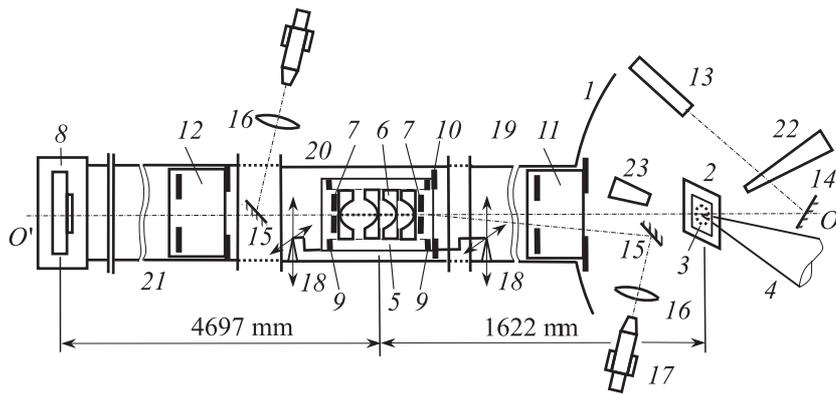


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — стенка вакуумной камеры, 2 — держатель мишени, 3 — мишень, 4 — пучок лазерного излучения, 5 — блок составной рентгеновской линзы, 6 — отдельная рентгеновская линза, 7 — метка центра, 8 — CCD-регистратор, 9 — Ta-диафрагмы, 10 — Pb-диафрагма, 11 и 12 — блоки диафрагм, 13 — юстировочный He-Ne-лазер, 14 и 15 — зеркала, 16 — объективы, 17 — микроскопы, 18 — юстируемые узлы крепления, 19 — переходник, 20 — патрубок, 21 — труба, 22 — камера-обскура, 23 — кристаллический спектрограф.

свободный объем в сборке заполняется ФПК. Отверждение полимера инициируется излучением с $\lambda \sim 320\text{--}360\text{ нм}$. После отверждения полимера линза и штамп извлекаются из оболочки, при этом линза не требует дальнейшей обработки; использовались специально подобранные полимеры с памятью формы, которые позволяют изготавливать линзы с точностью параболического профиля $\sim 2\text{--}3\text{ мкм}$ [6].

В настоящей работе описывается регистрация изображения лазерной плазмы в жестком рентгеновском излучении $E \approx 8\text{ keV}$ с помощью составной преломляющей рентгеновской линзы, объединяющей 10 идентичных линз. Генерация лазерной плазмы, возникающей при облучении плоской мишени остросфокусированным лазерным излучением, в качестве источника жесткого рентгеновского излучения осуществлена в эксперименте на йодной лазерной установке „Искра-5“ (см. рис. 2) [14]. При этом первая гармоника лазерного излучения одного из каналов установки „Искра-5“ с длиной волны $\lambda = 1.315\text{ мкм}$

фокусировалась на поверхность мишени линзой с фокусным расстоянием $F = 1$ м. При длительности лазерного импульса $\tau_{0,5} \approx 0.4$ ns плотность потока лазерного излучения в пятне облучения достигала $1.3 \cdot 10^{16}$ W/cm². При такой плотности потока лазерного излучения спектр рентгеновского излучения лазерной плазмы для материалов со средним $Z \approx 30$ наряду с непрерывной компонентой содержит интенсивную и узкую K -полосу линейчатого излучения с энергией квантов $E \approx 8-10$ keV. В качестве материала мишени в эксперименте использовалась медь. При фиксированных условиях облучения использование материала с большим Z привело бы к увеличению энергии квантов линейчатого рентгеновского излучения и соответственно к нежелательному увеличению фокусного расстояния рентгеновской линзы, а также к снижению интенсивности линейчатого излучения.

Изображение лазерной плазмы с фронтальной стороны мишени регистрировалось камерой-обскурой на рентгеновскую фотоплёнку в излучении с $E > 4$ keV. Изображение плазмы в жестком рентгеновском излучении, сформированное составной рентгеновской линзой, регистрировалось рентгеновской CCD-камерой с прямой регистрацией излучения с тыльной стороны мишени. Размер пикселей у камеры составляет $13.5 \mu\text{m}$, что с учетом коэффициента увеличения в плоскости мишени соответствует $4.7 \mu\text{m}$. На CCD-камере для защиты от видимого света и подавления рентгеновского излучения с энергией квантов менее ≈ 6 keV был установлен ряд фильтров. Оба направления наблюдения со стороны камеры обскуры и составной рентгеновской линзы были симметричны относительно плоскости мишени.

Спектр линейчатого рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $E \approx 7-9.5$ keV регистрировался с тыльной стороны мишени с помощью спектрографа на плоском кристалле LiF. Для точного определения энергии линий рентгеновского излучения в спектрографе устанавливалась полоска фильтра из подходящего материала (в нашем случае Ni), при этом на спектрограмме появляется хорошо различимый скачок поглощения, обусловленный K -скачком коэффициента фотопоглощения рентгеновского излучения в материале фильтра, на хорошо известной энергии квантов $E_{\text{Ni}} = 8.333$ keV. Зарегистрированная в опыте спектрограмма рентгеновского излучения показывает интенсивную полосу со средней энергией квантов $E \approx 8.03$ keV, которая использовалась в эксперименте для формирования изображения.

Фокусное расстояние одиночной рентгеновской линзы F_s рассчитывалось методом трассировки хода лучей с учетом поглощения

излучения в материале линзы для спектра линейчатого рентгеновского излучения с энергией квантов $E = 8.03 \text{ keV}$. Расчетное значение составило $F_s = 12055 \text{ mm}$, для составной линзы фокусное расстояние принято равным $F_N = 1205.5 \text{ mm}$. Расстояние от середины составной рентгеновской линзы до плоскости регистрации изображения в эксперименте составляло $S_2 = 4697 \text{ mm}$, поэтому в соответствии с формулой тонкой линзы ($1/S_1 + 1/S_2 = 1/F_N$) расстояние от середины линзы до мишени устанавливалось равным $S_1 = 1622 \text{ mm}$. Изображение при этом регистрировалось с увеличением $M = S_2/S_1 = 2.90$.

Для ориентации отдельных элементов составной рентгеновской линзы вдоль единой оси они укладывались в уголок, склеенный из двух стеклянных пластин с плоскими поверхностями, и плотно прижимались к ним через эластичную резиновую прокладку. Поскольку каждая из одиночных линз изготовлена на одной и той же технологической сборке, а ось параболической полости линзы с высокой точностью совпадает с осью ее внешней цилиндрической поверхности, то такой способ сборки практически не ухудшает качество фокусировки составной линзой в сравнении с одиночной линзой.

Точность совмещения меток линзового блока с осью пучка He–Ne-лазера, использованного для юстировки, по оценкам не хуже $100 \mu\text{m}$. Соответственно точность совмещения оси составной линзы с осью пучка He–Ne-лазера с учетом точности установки меток на одиночных линзах по углу не хуже 2.1 mrad . Точности совмещения центра мишени с осью пучка He–Ne-лазера и попадания в него силового лазерного излучения не хуже $100 \mu\text{m}$, а их вклад в точность по углу составляет не более 4%.

Изображение плазмы в области пятна фокусировки силового лазерного излучения, зарегистрированное в эксперименте с помощью камеры-обскуры, представлено на рис. 3, *a*. Изображение плазмы, зарегистрированное с помощью составной рентгеновской линзы в жестком рентгеновском излучении, и результаты его прописи (размеры сгустка плазмы) в двух перпендикулярных сечениях представлены на рис. 3, *b* и рис. 3, *c* соответственно. Из рис. 3, *a* и 3, *b* видно, что оба изображения близки друг к другу как по форме и взаимной ориентации, так и по характеру неоднородного распределения яркости на них. Протяженность наиболее резкого края изображения, зарегистрированного линзой, составляет $\sim 20 \mu\text{m}$. Изображение на рис. 3, *b* выглядит в значительной степени более неоднородным, чем на рис. 3, *a*; на нем видны

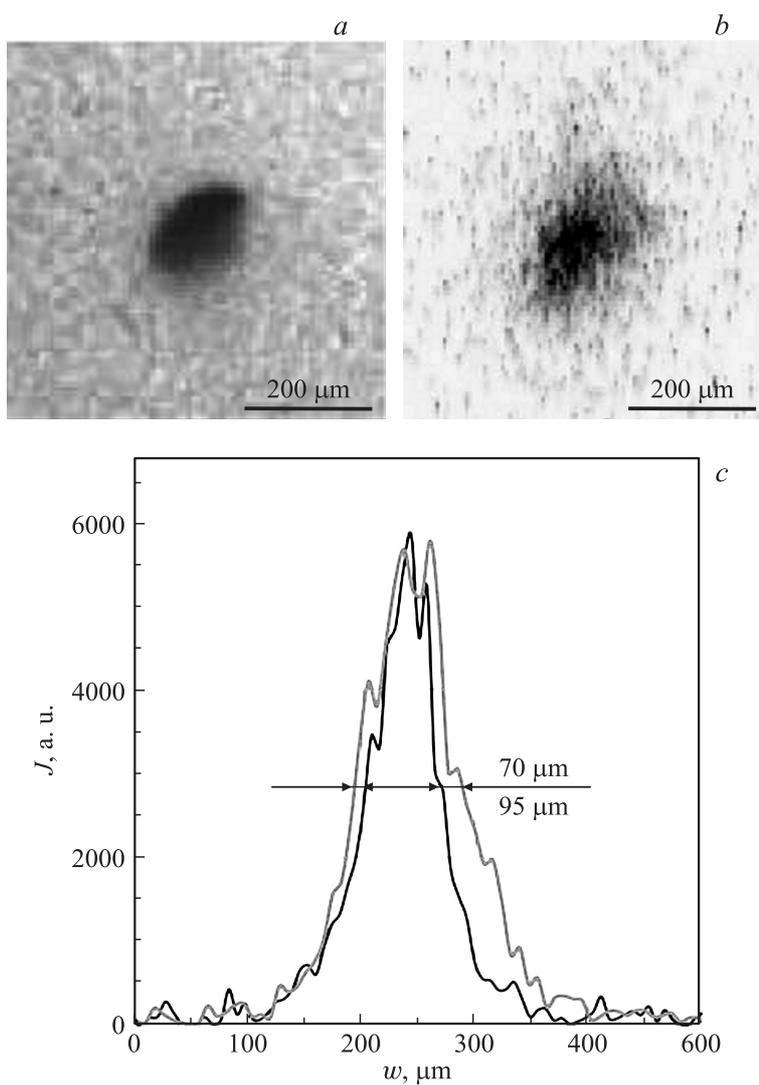


Рис. 3. Зарегистрированные излучения плазмы: камерой-обскурой (*a*) и составной рентгеновской линзой (*b*), (*c*) — прописи изображения (*b*) в двух перпендикулярных направлениях.

несколько ярких пятен, что может быть связано с появлением в пятне облучения узконаправленных пучков горячих электронов, вызывающих вспышки монохроматического характеристического излучения материала мишени. Максимальная яркость изображения, зарегистрированного линзой, достаточно высока и в ~ 50 раз превышает уровень фона на CCD-камере. Таким образом, в условиях лазерного эксперимента с помощью составной рентгеновской линзы в квантах с энергией ≈ 8 keV впервые получено детальное рентгеновское изображение лазерной плазмы с высоким пространственным разрешением.

Данный экспериментальный метод при наличии соответствующей регистрирующей аппаратуры позволит надежно регистрировать динамику плазмы по таким параметрам, как относительная локальная интенсивность рентгеновского излучения отдельных фрагментов изображений (см. рис. 3). В свою очередь, знание динамики с достаточным временным разрешением резко улучшит достоверность экспериментальных данных по свойствам плазмы. Используя адекватную модель процесса, которая учитывает сложную кинетику взаимодействия излучения с веществом мишени, отрыв электронной и ионной температур и другие особенности, исследуемые характеристики могут быть восстановлены путем компьютерного моделирования (см. [15]).

В работе показано, что использование составных рентгеновских линз данной конструкции эффективнее применения традиционной камеры-обскуры. Применение линз позволяет получать локальные, достаточно подробные, экспериментальные данные о пространственной структуре (а при наличии аппаратуры и временной динамике) лазерной плазмы в экстремальном состоянии в условиях, когда исследование такой плазмы оптическими методами недостаточно или невозможно. Полученные характеристики размеров лазерных ступок, степени их однородности и временной динамики можно корректно сопоставить с результатами компьютерного моделирования соответствующих газодинамических процессов, реализующихся в полномасштабных экспериментах, определить адекватность теоретических моделей вещества при высоких давлениях и концентрациях энергии.

Список литературы

- [1] *Regan S.P., Falk K., Gregori G. et al // PRL. 2012. V. 109. P. 265003.*
- [2] *Sinars D.B., McBride R.D., Pikuz S.A. et al // PRL. 2012. V. 109. P. 155002.*

- [3] *Ma T., Döppner T., Falcone R.W.* et al // PRL. 2013. V. 110. P. 065001.
- [4] *Colgan J., Abdallah J., Jr., Faenov A.Ya.* et al // PRL. 2013. V. 110. P. 125001.
- [5] *Fortov V.E., Ilkaev R.I., Arinin V.A.* et al // PRL. 2007. V. 99. P. 185001.
- [6] *Треушников В.М., Треушников В.В., Павлов Г.А.* Способ и форма для изготовления рентгеновских фокусирующих линз. Патент РФ № 2470271.
- [7] *Snigirev A., Kohn V., Snigireva I.* et al // Nature. 1996. V. 384. P. 49.
- [8] *Pavlov G., Snigireva I., Snigirev A.* et al // X-Ray Spectrom. 2012. V. 41. P. 313.
- [9] *Павлов Г., Snigireva I., Snigirev A.* и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 5. С. 104.
- [10] *Сагдуллин Т.А., Шабельников Л.Г., Иржак Д.В.* // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2010. № 10. С. 3.
- [11] *Lengeler B., Tummler J., Snigirev A.* et al // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. P. 5855.
- [12] *Чесноков С.А., Треушников В.М., Чечет Ю.В.* и др. // ВМС. А. 2008. Т. 50. С. 456.
- [13] *Treushnikov V.M., Chesnokov S.A.* // J. Photochem. Photobiol. A. 2008. V. 196. P. 201.
- [14] *Анненков В.И., Беспалов В.И., Бредихин В.И.* и др. // КЭ. 2005. Т. 35. С. 993.
- [15] *Park H.-S., Hurricane O.A., Callahan D.A.* et al // PRL. 2014. V. 112. P. 055001.